Ciencia e Ingeniería
Revista Interdisciplinar de Estudios en Ciencias Básicas e Ingenierías.
Año 2015, Julio-Diciembre, Vol. (2) N° (2) ISSN 2389-9484.
Universidad de La Guajira, Facultades de Ciencias Básicas y Aplicadas e Ingeniería.
La Guajira-Colombia.
Revista en Línea http://revistas.uniguajira.edu.co/index.php/cei

CONVERSIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA EL CONTROL POR MODO DESLIZANTE DE LA ILUMINACIÓN DEL PLAZA BOLIVAR DE LA CIUDAD DE SANTA MARTA

PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONVERSION FOR SLIDING MODE CONTROL OF LIGHTING PLAZA BOLIVAR CITY OF SANTA MARTA

José Maestre y Gerzhel Gómez

Ingeniería de Control y Automatización de Procesos.
Universidad Rafael Belloso Chacin-URBE
gerzhel@uniguajira.edu.co.

Recibido: Marzo 20 de 2014 Aceptado: julio 13 de 2015

RESUMEN

La búsqueda de fuentes de energía que ayuden a soportan los crecientes requerimientos energéticos sin sacrificar el medio ambiente es un punto importante dentro del desarrollo de las naciones. En este sentido, fuentes de energía renovables como la energía solar aparecen como posibilidades energéticas inagotables además el gran interés que presenta gracias a su disponibilidad y al ser ambientalmente limpias. Por tanto, una de las temáticas de mayor interés es el uso de la energía solar fotovoltaica para el control inteligente de sistemas de iluminación. En este trabajo investigativo se procedió a calcular la demanda de los módulos LED utilizadas por su eficiencia luminosa, para así poder calcular cada uno de los elementos del sistema fotovoltaico que garantizara eficientemente la demanda durante los 365 días del año, con una duración mínima de los equipos de alrededor de 25 años en la Plaza Bolívar de la ciudad de Santa Marta – Colombia, en este sitio se tiene un promedio de 5 horas pico sol, como punto final se toman datos de corrientes y voltajes reales para determinar la capacidad de generar energía en un día soleado, nublado, lluvioso, entre otros. Se concluyó que los sistemas fotovoltaicos pueden tener las mismas aplicaciones que cualquier sistema generador de electricidad. Sin embargo, las cantidades de potencia y energía que se pueden obtener de un sistema fotovoltaico están limitadas por la capacidad de generación y almacenamiento de los equipos instalados, especialmente de los módulos y la batería respectivamente, y por la disponibilidad del recurso solar. Se recomendó que el inversor instalado permita la conexión al sistema de un moto-generador auxiliar y se puede instalar un sistema automático para el arranque del mismo, lo cual si bien no se incluyó en este sistema, pudiera ser una añadidura interesante para hacer que el sistema sea aún más completo. Adicionalmente se pudiera instalar un sistema automático de monitoreo y control de este sistema, lo cual lo haría bastante atractivo desde el punto de vista didáctico.

Palabras Clave: Energía solar fotovoltaica, Control en modo deslizante, Inversor, Convertidor estático, Iluminación

ABSTRACT

The search for energy sources that help support the growing energy requirements without sacrificing the environment is an important point in the development of nations. In this sense, renewable energy sources such as solar energy inexhaustible possibilities appear as well the great interest presented due to its availability and to be environmentally clean. Therefore, one of the topics of greatest interest is the use of photovoltaic solar energy for intelligent control of lighting systems. In this research work we proceeded to calculate the demand for LED modules used by its luminous efficiency, in order to calculate each of the elements of the photovoltaic system that efficiently ensure the demand for 365 days a year, with a minimum duration of teams of about 25 years in the Bolivar Plaza in the city of Santa Marta - Colombia, this site has an average of 5 peak sun hours, as the endpoint data streams and actual voltages are taken to determine the capacity to generate energy in a sunny, cloudy, rainy day, among others. It was concluded that PV systems can have the same applications as any system electricity generator. However, the quantities of power and energy that can be obtained from a photovoltaic system are limited by the capacity of generation and storage of installed equipment, especially battery modules and respectively, and the availability of solar resource. It was recommended that the investor is allowing the connection to the system of a motor-generator assistant and can be installed an automatic system for the removal of material, which although not included in this system could be an interesting addition to the system even more complete. Additionally it could install an automatic monitoring and control of this system, which would make it quite attractive from the educational point of view.

Key words: Photovoltaic solar energy, sliding mode control, inverter, static converter, lighting.

I. INTRODUCCIÓN

El cambiante mundo de los negocios que actualmente se vive, es un mundo lleno de retos cuya complejidad crece a medida que la competitividad en el mercado también lo hace. Esta razón, es fundamental para que el gerente de hoy deba administrar sus recursos bajo condiciones cuyo nivel de dificultad varía de acuerdo a las circunstancias económicas, sociales, políticas y culturales que influyen directa o indirectamente en su misión organizacional.

Como consecuencia, cada día se hace más complejo y por supuesto, más costoso, contar con recursos humanos y tecnológicos que le brinden a la empresa una mejor imagen en el mercado, considerando que Colombia es un país cuya tecnología proviene de los países desarrollados, específicamente en el campo de los procesos industriales, que son áreas esenciales para el desarrollo de sistemas en cuanto a técnicas y herramientas se refiere.

De esa forma, existe un creciente interés a nivel mundial por el uso y desarrollo de fuentes limpias de energía que ayuden contrarrestar los efectos del cambio climático, según explica Greenpeace (2008). Martins y Demonti (2000), describen que den soporte a los crecientes requerimientos energéticos actuales. En ese contexto, la energía solar y en particular la energía fotovoltaica (FV), es una de las opciones energéticas de amplio crecimiento debido a su abundancia, disponibilidad y el no ser contaminante.

Es por ello, que para aprovechar la energía solar, se utilizan los dispositivos semiconductores, los cuales son el medio de un fenómeno físico denominado efecto fotoeléctrico, convirtiendo la radiación electromagnética en energía eléctrica. Por ello, que uno de los principales problemas es la baja eficiencia de conversión de energía cercana al 20% en dispositivos comerciales, según expone Ameco (2011). Por lo tanto, es importante lograr un proceso de conversión de energía eficiente que permitan aprovechar al máximo la energía eléctrica que pueda ser generada a partir del efecto fotoeléctrico.

Siendo las cosas de esa manera, la energía fotovoltaica es típicamente aprovechada en dos maneras; la primera recurre al almacenamiento de la energía generada en baterías que aseguren autonomía energética a una carga específica; y la segunda es enviando la energía generada a la red de distribución de energía, para que esta pueda ser aprovechada por los usuarios conectados a la red.

Así, cuando la energía se envía a la red es importante asegurar que la energía generada por efecto fotoeléctrico sea la máxima posible dependiendo de las condiciones ambientales (irradiación solar y temperatura) y de esta forma hacer que el sistema de generación sea tanto eficiente, como competitivo.

II. DESARROLLO

1. EL PROBLEMA DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA E ILUMINACIÓN EN LA PLAZA BOLIVAR

Al realizar una descripción del proceso del sistema fotovoltaico, permitió establecer una referencia para la técnica de control a implementar, ayudando a su vez, a definir las

variables susceptibles de control que afectan el punto de potencia máxima en los paneles solares.

Así, específicamente en lo referente a la etapa del panel solar, es importante recordar que éstos se encargan de realizar una conversión de la energía solar en energía eléctrica y permanentemente dependen de los rayos del sol que inciden en las celdas fotovoltaica; de allí, que la variable más importante a controlar, es la temperatura, características de esta habitad zonas árida y húmedas como es la de la Ciudad de Santa Marta.

De esa forma, la implementó un lazo de control, el cual conllevara a una eficiente estrategia de control, así como también, realiza un seguimiento al máximo punto de potencia de un SFV, en la figura 1 se muestra un esquema pictórico de más o menos como sería el funcionamiento del sistema.

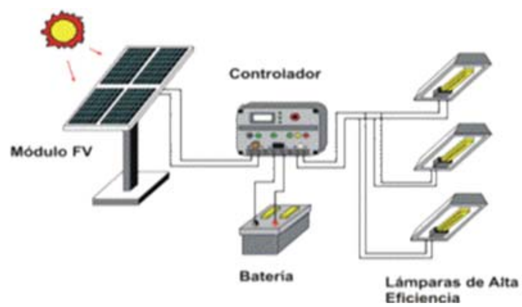


Figura 1. Esquema pictórico de un sistema fotovoltaico. Fuente: Maestre (2014).

2. TÉCNICAS DE CONTROL PARA LA MEJORA DE LAS ILUMINARIAS.

El sistema consta de un generador solar, compuesto por un conjunto de celdas fotovoltaicas que captan la radiación luminosa procedente del sol y la transforman en corriente continua. Estas se conforman celdas en serie y paralelas. Al haber desacoplamiento entre el voltaje en la carga y la entregada por el panel solar, se evidencia la necesidad de un regulador o convertidor DC-DC, cuya misión es evitar sobrecargas o descargas excesivas al acumulador, además de asegurar que el sistema trabaje siempre en el punto de máxima eficiencia.

El sistema o lazo de control estaría formado básicamente por cuatro subsistemas cada uno con su propia función como se muestra en la figura 2, donde se muestra el esquema propuesto para el MPPT y se encontraría conectado a una batería que es la encargada de suministrar energía a la carga independientemente de la producción eléctrica del generador fotovoltaico y garantizar la estabilidad de la tensión de funcionamiento, esta batería posteriormente alimenta una carga de iluminación que no se toma como subsistema.

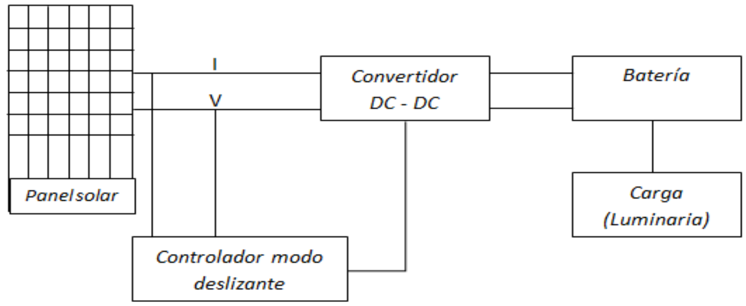


Figura 2. Esquema del sistema propuesto. Fuente: Maestre (2014).

Este sistema utiliza un generador fotovoltaico (s x p) compuesto de s celdas en serie y p celdas paralelas. Se conecta entonces a un convertidor de DC-DC con el fin de aumentar o disminuir la tensión deseada. Luego, se conecta directamente a una batería de 12 V que alimenta una luminaria led de 20w. El ciclo de trabajo del convertidor es controlado por un controlador de modo deslizante.

El modelo propuesto garantizará la extracción de la potencia máxima que puede ser producida por el módulo fotovoltaico, mientras se regula la tensión de carga a la tensión de la batería. De esa manera, se puede tener una tensión de carga viable que pueda conectarse a un inversor mientras que acopla la resistencia de carga a la resistencia óptima del módulo fotovoltaico.

Teniendo en cuenta que las variables que influyen a la obtención del máximo punto de potencia principalmente dependen de la corriente y voltaje provenientes del panel solar, es necesario tener en cuenta las características eléctricas del módulo fabricado y el cual se utilizó, se tomó en cuenta el siguiente: Sunpower SP55.

Tabla1. Características módulo solar Siemens SP55.

Características módulo solar Siemens SP75	
Parámetros Eléctricos	12V
Potencia optima máxima P_{mmp} (W)	55
Corriente óptima I_{op} (A)	3.78
Voltaje óptimo V_{op} (V)	15.614
Corriente en corto circuito I_{sc} (A)	4,1
Voltaje de circuito abierto V_{oc} (V)	19.25
Coeficiente de Voltaje (TCv)	-0,1V/°C
Coeficiente de Corriente (TCi)	0.002A/°C
Potencia pico máxima $P_{máx}$ (W)	55

Fuente: Sunpower de Colombia

En la Tabla 1, de la hoja de datos del fabricante de módulo solar Sunpower SP55 que la potencia máxima pico es de 55W con unos datos de masa de aire de AM = 1.5, Irradiación E = 1000W/m2 y temperatura en la celda Tc = 25 °C. Además poseen 36 celdas fotovoltaicas de 6x6, lo cual se detalla en los anexos que se encuentran la hoja de datos de dicho módulo.

De esa forma, diferentes métodos para modelar las celdas solares han sido propuestos; algunos están basados en circuitos equivalentes conocidos como modelo de un solo diodo y de doble diodo (Khaligh & Onar, 2009). Estos modelos requieren el cálculo de varias constantes y parámetros que no son suministrados por los fabricantes. Otros modelos se basan en el comportamiento eléctrico, describiendo la relación entre la

corriente y el voltaje en sus terminales; así como también el efecto de la temperatura y la irradiación (Ortiz-Rivera & Peng, 2005), y es en el cual se basará la presente investigación.

En el modelo analítico del comportamiento eléctrico, la relación entre la corriente suministrada I y el voltaje en los terminales V de la celda solar está dada por las ecuaciones:

$$I(V) = \frac{I_x}{1-exp\left(\frac{-1}{b}\right)}\left[1 - e^{\left(\frac{V}{b.V_x}-\frac{1}{b}\right)}\right] \qquad (1)$$

$$P(V) = V.I(V) = \frac{V.I_x}{1-e^{\left(\frac{-1}{b}\right)}}\left[1 - e^{\left(\frac{V}{b.V_x}-\frac{1}{b}\right)}\right] \qquad (2)$$

$$V_x = s.\frac{E_i}{E_{in}}.TCV.(T-T_N) + s.V_{max} - s.(V_{max}-V_{min}).e^{\left(\frac{E_i}{E_{in}}.ln\left(\frac{V_{max}-V_{oc}}{V_{max}-V_{min}}\right)\right)} \qquad (3)$$

$$I_x = p.\frac{E_i}{E_{in}}.[I_{sc} + TC_i.(T-T_N)] \qquad (4)$$

Para las anteriores ecuaciones se tiene que:
b: es la constante característica del panel, no tiene unidades y es el único parámetro que debe ser calculado en el modelo de Ortiz.
s: representa el número de paneles en serie.
p: representa el número de paneles en paralelo.
Ei: es la irradiación efectiva a la que opera el panel.
Ein: es una constante de irradiación de 1000W/m2.
T: es la temperatura de operación a la que opera el panel.
TN: es una constante de temperatura de 25°C.
Voc: es el voltaje de circuito abierto.
Isc: es la corriente de cortocircuito del panel

Para encontrar el valor de b, se utiliza la ecuación (1) y los parámetros eléctricos del panel FV presentados en la Tabla 1. Partiendo de que el valor de b se encuentra en el rango de 0,01 a 0,18 se puede hacer la siguiente aproximación:

$$1 - e^{\left(\frac{-1}{b}\right)} \approx 1 \qquad (5)$$

Por lo tanto, para Vx=19,267V, Ix=3,761A, I=3,526A y V=15,614V, el valor de b encontrado utilizando la ecuación (1) es de b=0,063. Además, las dos primeras ecuaciones (1) y (2) describen la relación de la corriente y la potencia con respecto a la tensión. El modelo del módulo fotovoltaico (PVM) tiene en cuenta la temperatura, T, e irradiancia efectiva, Ei, bajo las condiciones de prueba estándar, STC, es decir, TN es de 25 º C y Ein es 1000 W/m2.

La hoja de datos de fabricante proporcionará los valores de los coeficientes de variación de la tensión con respecto la temperatura, TCV, y la variación de la corriente con respecto a la temperatura, TCi, la tensión de circuito abierto, Voc, la corriente de corto, ISC, bajo condiciones, STC y el PVM. La mayoría de los fabricantes proporción el valor de la tensión en circuito abierto, Vmax, cuando Ei es más de 1.200 W/m2 y T es 25 °C y la tensión de circuito abierto , Vmin, cuando Ei es menos de 200 W/m2 y T es 25ºC. El voltaje de circuito abierto para cualquier T o Ei, Vx está dada por la ecuación (3), y se calcula cuando la corriente de operación es cero. La corriente de cortocircuito

para cualquier T o Ei, se calcula cuando la tensión de la operación es cero y está dada por la ecuación (5).

2.1. Simulación del Panel FV en Matlab-Simulink

El panel FV se simuló utilizando los bloques de funciones con los que cuenta Simulink en los cuales se introdujeron las ecuaciones Vx, Ix y para la relación I-V según se muestra en la figura 3. Con las funciones creadas, se realizó un subsistema de nombre arreglo de paneles, tomando como parámetros de entrada la irradiación Ei en W/m2, la temperatura T en °C y la función rampa, que simula la carga incremental que sirve para poder observar el comportamiento con diferentes cargas y como salidas los valores de corriente I en amperios y/o voltaje V en voltios. Los valores de I y V son utilizados para generar las curvas P-V e I-V directamente en simulink y además son exportados al workspace de Matlab. El modelo resultante del panel FV se ilustra en el figura 4.

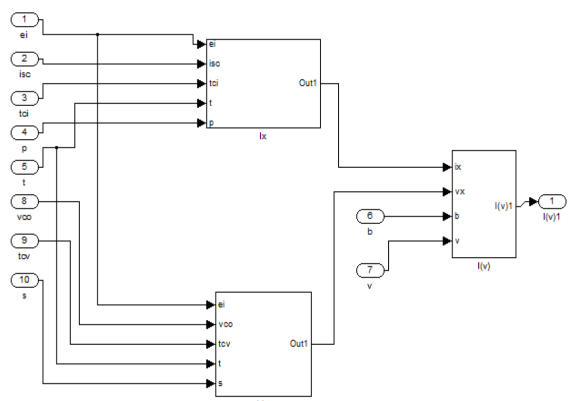


Figura 3. Ecuaciones del panel FV en Simulink. Fuente: Maestre (2014).

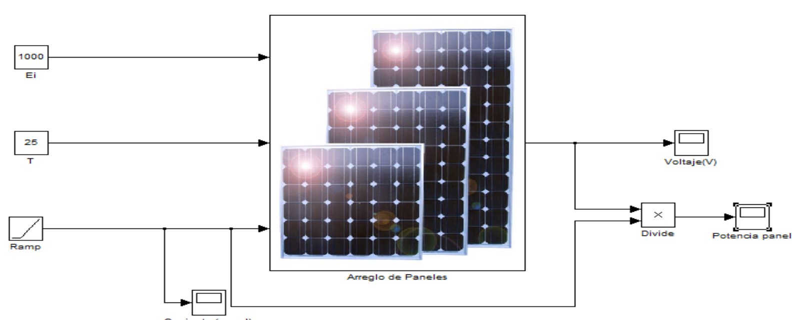


Figura 4. Subsistema del panel FV en simulink. Fuente: Maestre (2014).

Una vez simulado el modelo matemático se realizaron pruebas para condiciones estándares de prueba con Ei=1000W/m2 y T=25°C, con lo que se obtuvieron las curvas I-V y P-V características de un panel FV que se muestran en la figura 5:

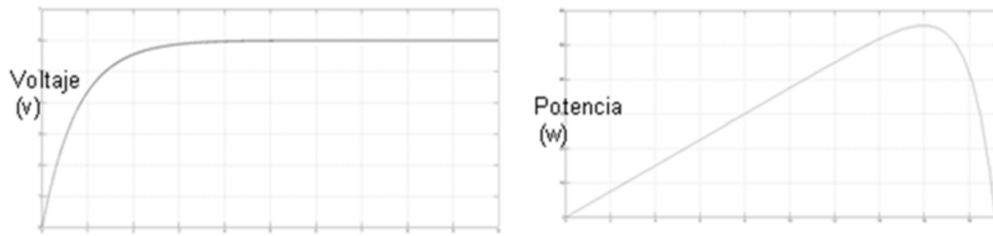


Figura 5. Curvas I-V y P-V del panel FV. Fuente: Maestre (2014).

Como se puede apreciar en las curvas obtenidas, el bloque del panel solar simulado en Matlab-simulink cumple con el comportamiento real de un panel FV

2.2. La Superficie Controlador Modo deslizante

Un controlador de modo deslizante es un control de estructura variable de donde la dinámica de un sistema no lineal es alterada a través de la aplicación de un control de conmutación de alta frecuencia. En el control de modo deslizante, las trayectorias del sistema se ven obligadas a llegar a una superficie de deslizamiento colector, donde se expone las características deseadas, en un tiempo finito y para permanecer en el colector para todo el tiempo futuro. Esto se logra mediante la estrategia de control adecuado

Para aplicar control de modo deslizante tenemos que saber si el sistema puede alcanzar el deslizamiento de colector. Una vez que los sistemas alcancen el deslizamiento de colector, el controlador tiene que forzar al sistema a permanecer en el colector para todo el tiempo futuro. Para diseñar el controlador por modo deslizante tenemos que seleccionar la superficie deseada. Se desea obtener la potencia máxima que se puede extraer desde el módulo fotovoltaico PV con los factores dado. Una curva P-V típico para un PVM está dada por la figura 6.

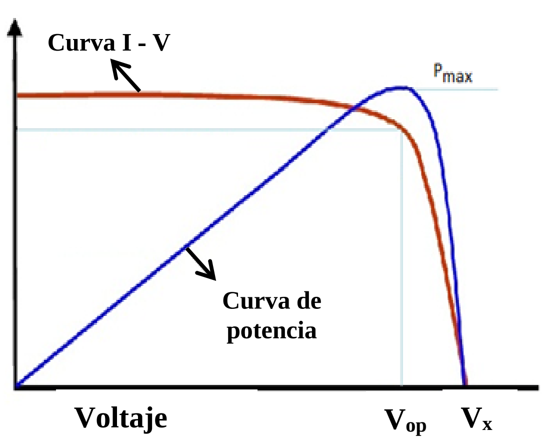


Figura 6. Salida del Panel Potencia vs. Tiempo. Fuente: Guldemir y Sharaf (2009).

Claramente, la figura muestra que la máxima potencia se produce a una tensión óptima, Vop dado, y la cual es menor que la tensión de circuito abierto, Vx. Derivando de la

potencia con respecto a la tensión (la ecuación 1) se puede obtener la siguiente expresión:

$$\frac{\partial P(V)}{\partial V} = \frac{I_x - I_x.exp\left(\frac{V}{b.V_x} - \frac{1}{b}\right)}{1 - exp\left(\frac{-1}{b}\right)} - V.\frac{-I_x.exp\left(\frac{V}{b.V_x} - \frac{1}{b}\right)}{b.V_x - b.V_x.exp\left(\frac{-1}{b}\right)} \quad (6)$$

En el codo de la curva de PV se da la potencia máxima de la PVM, y es ente punto donde la derivada de la potencia con respecto a la tensión es cero. La solución de (6) y despejando, se obtiene la tensión óptima, Vop.

Desafortunadamente, (6) es una función trascendental que no se pueden resolver para V. Para resolver este inconveniente se utiliza el método de coordenadas lineales, la cual sirve para aproximar el valor óptimo y así obtener la potencia máxima dada en la ecuación (7):

$$V_{op} = V_x + V_x \times b \times Ln\left(b - b \times e^{(1/b)}\right) \quad (7)$$

Donde es el voltaje de circuito abierto, es la constante característica para el PVM. Para obtener la corriente óptima, Iop, la ecuación (7) se sustituye en la (1). Por último, podemos expresar nuestro deslizamiento de colector de la siguiente manera:

$$S = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} sign\left(V_{op} - V\right) \quad (8)$$

Para el diseño de la mejora en un punto de iluminación de la Plaza Bolívar de la ciudad de Santa Marta se basó en el punto de extracción de la máxima potencia del panel solar, y la topología utilizada para el convertidor fue la tipo Buck no-inversor, en la cual el voltaje de salida es menor al voltaje de entrada y su función es que permite acondicionar la señal proveniente del panel FV utilizando un control en modo deslizante.

Se eligió esta topología puesto que los paneles FV a manejar poseen un rango de voltajes por encima de los 14 V y necesitan ser regulados para conectarse a la batería de 12V que alimenta una luminaria led de 20w. En la figura 7 se presenta la topología que fue diseñada para garantizar que el convertidor opere en el modo de operación continuo (MOC), y así evitar que la corriente en el inductor sea cero durante un intervalo de tiempo.
.

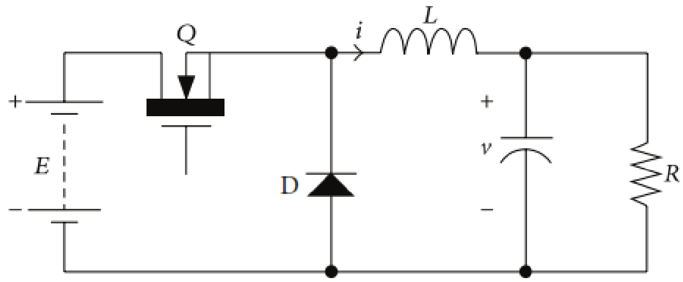


Figura 7. Convertidor DC-DC Buck. Fuente: Maestre (2014).

El valor del inductor es diseñado para mantener el balance volts por segundo del convertidor y para reducir el rizado en la corriente de salida. En caso de que se utilice un valor de inductor inadecuado se ocasionará un rizado AC en la salida de DC y puede

existir un cambio entre el modo de operación continuo y el discontinuo. Para mantener el MOC la corriente mínima de salida del convertidor debe ser (Rogers, 1999):
Con el fin de mantener un compromiso entre el tamaño del inductor y del capacitor, se considera un buen criterio de diseño trabajar con un rizado del 10-30% de la corriente de salida Io.

Para realizar el modelado del convertidor DC-DC en Simulink se plantean las ecuaciones de voltaje y corriente teniendo en cuenta la figura 2 y el ciclo útil D. Se realizó un subsistema llamado DC-DC Buck teniendo como entradas las salidas del panel FV y el ciclo útil D y como salidas los valores de corriente y voltaje de la batería modificados por el valor del ciclo útil. El subsistema realizado permite ajustar de forma sencilla a través de una máscara los valores de L y C. El modelo resultante del convertidor se ilustra en el figura 8.

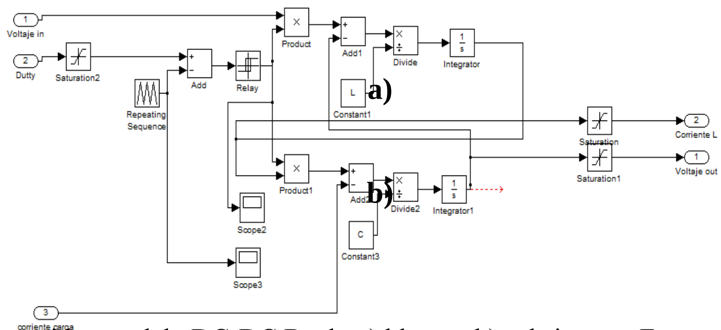


Figura 8. Convertidor modelo DC-DC Buck: a) bloque; b) subsistema. Fuente: Maestre (2014).

Una vez simulado el modelo se realizaron pruebas para condiciones estándares de prueba con Ei=1000W/m2 y T=25°C, con lo que se obtuvieron las curvas de salida de voltaje y corriente que se muestran en la figura 9 (marca de los parámetros), figuras10 y 11.

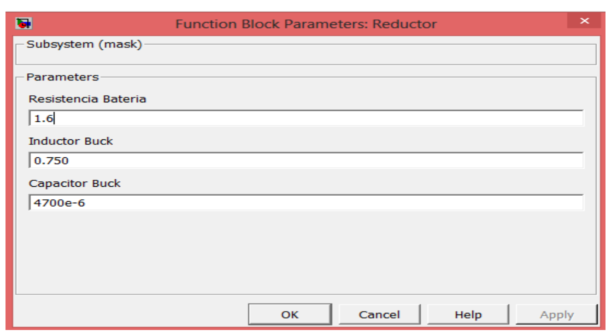


Figura 9. Voltaje con ciclo útil de 0.6 y una carga de prueba de 1.6 Ohm. Fuente: Maestre (2014).

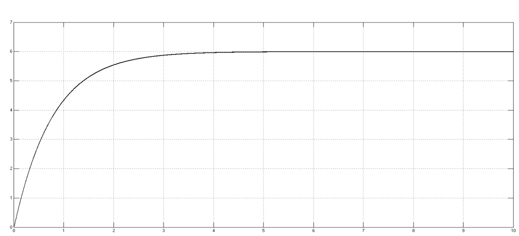


Figura 10. Gráfica del voltaje con ciclo útil de 0.6 y una carga de prueba de 1.6 Ohm. Fuente: Maestre (2014).

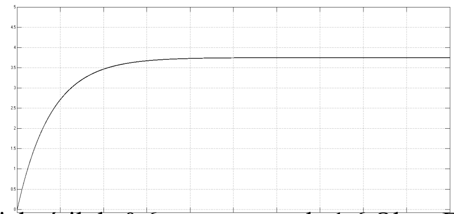


Figura 11. Corriente con ciclo útil de 0.6 y una carga de 1.6 Ohm. Fuente: Maestre, J, (2014).

La mejora en un punto de iluminación de la Plaza Bolívar de la ciudad de Santa Marta se basó en el punto de extracción de la máxima potencia del panel solar, es la encargada de suministrar energía a la carga independientemente de la producción eléctrica del generador fotovoltaico y garantizar la estabilidad de la tensión de funcionamiento.

La herramienta SimPowerSystem permite la simulación de la batería de una manera sencilla, por lo tanto se escoge realizar la simulación con SimPowerSystem. Simulink ofrece una batería basada en el modelo de Copetti, Lorenzo y Chenlo, pero no será usada en esta investigación debido a que exige parámetros experimentales que la batería brinda al cargarse y descargarse su energía en diferentes formas. Se utilizara el modelo de Randles debido a que sus parámetros se obtienen directamente de la Hoja de datos correspondiente a la batería (Gauchía, 2008).

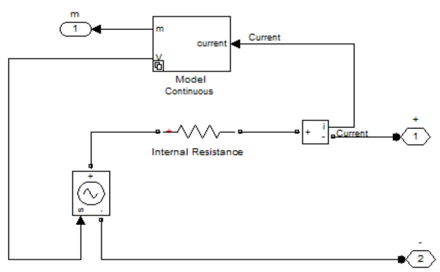


Figura 12. Diagrama Interno de la Batería de SimPowerSystem. Fuente: Maestre (2014)

Encontrar un modelo matemático de una batería es difícil, debido a que los químicos no actúan de manera lineal. Por lo tanto varios autores proponen distintos circuitos equivalentes, los valores de las resistencias y de los capacitores son obtenidos por medio de experimentación o directamente de la hoja de características del fabricante. Se escoge el equivalente de Randles para la carga de la batería y se hallaron los valores. La batería escogida fue la C10 AGM VRLA ref BAT412101080. Esta batería posee una carga y una tensión de descarga total de 11V. Este capacitor es el capacitor en el modelo de Randles Figura 13.

$$C = \frac{Q}{V} \rightarrow C = \frac{100Ah}{2.5} \rightarrow C = 40F \quad (9)$$

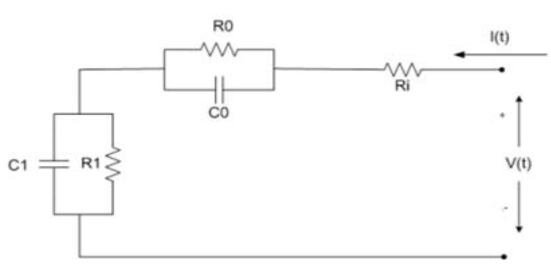


Figura 13. Circuito equivalente de Randles. Fuente: Bhangu (2005)

La hoja de características indica que el coeficiente de auto descarga es bastante pequeño por lo cual para este trabajo será considerada infinitamente grande (no contiene auto descarga). La resistencia interna de la batería varia de 0.6 a 3 mΩ para una batería de 100Ah (Ramírez, 2004) pero este caso no es una batería plomo acido sino VRLA AGM. La resistencia interna no varía mucho frente a las baterías de plomo acido (Ramirez, 2004, pág. 24). Se escoge el capacitor y se obtiene de la gráfica de carga de la batería que se indica a continuación figura 14.

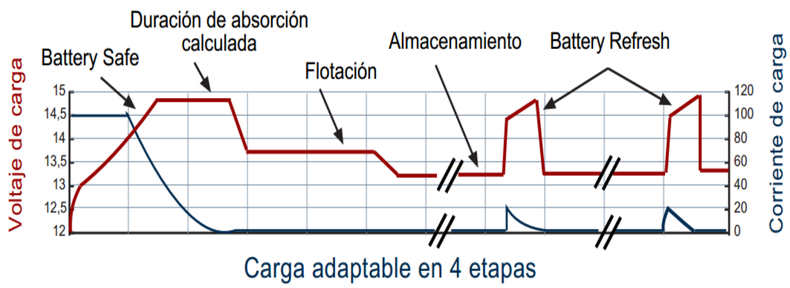


Figura 14. Carga y de Sostenimiento de la Batería. Fuente: Victron Energy (2011).

De la figura 14 se halla el capacitor por medio de la descarga de la parte de sobretensión de la misma. Si se conoce el tiempo de descarga se obtiene que:

$$\tau = R_0 C_0 \quad (10)$$

Donde es el tiempo que demora en descargarse el capacitor en un 63.2%

$$C_0 = \frac{\tau}{R_0} \rightarrow C_0 = \frac{6000s}{3m\Omega} = 5uF \quad (11)$$

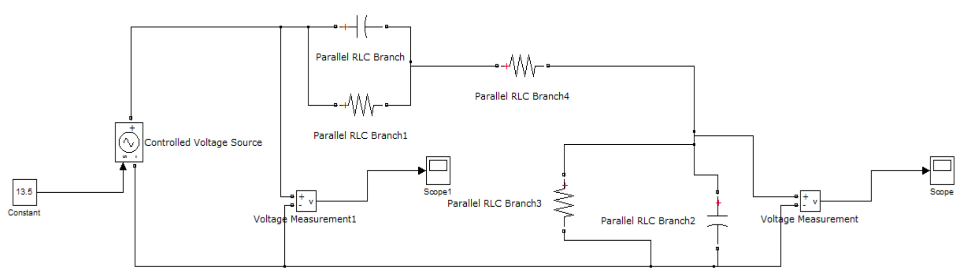


Figura 15. Simulación de una Batería en SimPowerSystem. Fuente: Maestre (2014).

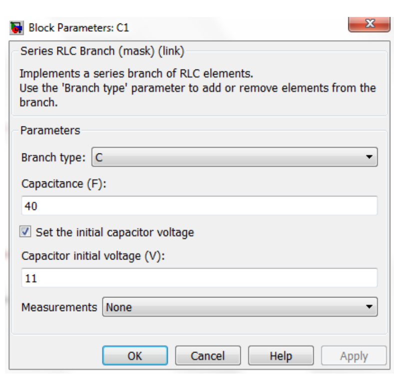


Figura 16. Inicialización de Componentes. Fuente: Maestre, J, (2014).

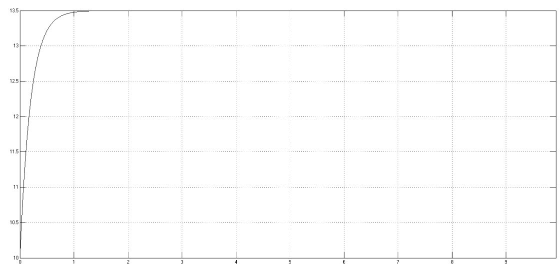


Figura 17. Carga de la batería. Fuente: Maestre (2014).

De la figura 17, se puede apreciar que el modelado se asemeja al comportamiento real mostrado en la figura 5. La simulación de los cuatro subsistemas (panel,controlador, convertidor y batería) se muestra en la figura 18.

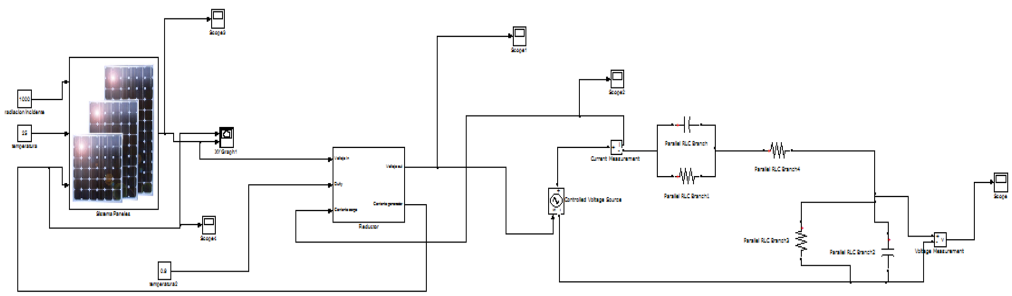


Figura 18. Simulación del SFV en Matlab/simulink. Fuente: Maestre (2014).

El voltaje de carga de la batería se muestra en la figura 19

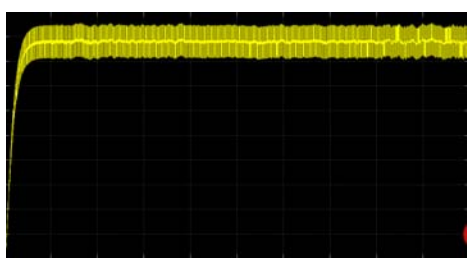


Figura 19. Voltaje de salida de la batería Matlab/simulink. Fuente: Maestre (2014).

Se procede a verificar el comportamiento del sistema en presencia de una variación de la irradiación.

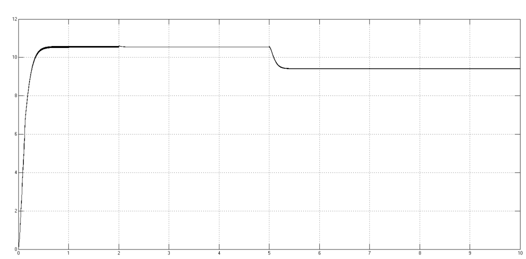


Figura 20. Salida del buck frente un cambio de irradiación causado por una perturbación. Fuente: Maestre (2014).

En la figura 22 se simula en el convertidor DC –DC buck, una perturbación en el tiempo t(5),con una irradiación que varía de a de a , y se comprueba el sistema, que disminuye su tensión a consecuencia de la carga, no garantizando el requerimiento necesario para que la batería entre en su etapa de absorción, comportándose además el convertidor como una carga (consumiendo potencia).

En la figura 21 se muestra la máscara donde se puede simular distintas perturbaciones (cambio de irradiación).

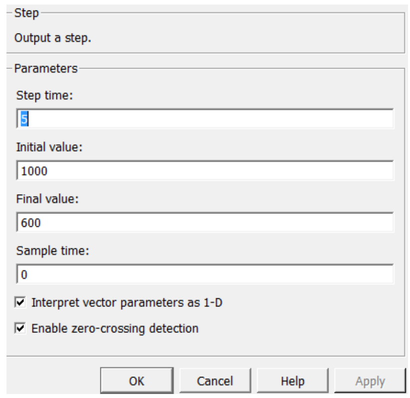


Figura 21. Bloque de fuente step con la perturbación en la irradiación. Fuente: Maestre (2014).

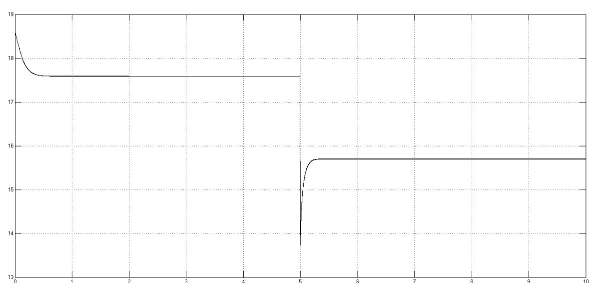


Figura 22. Salida de voltaje del panel bajo una perturbación. Fuente: Maestre (2014).

Voltaje de salida del panel con respecto a tiempo y con la perturbación anterior, obteniendo una variación significativa de la tensión, ocasionando un decremento de la potencia de salida del panel que impide que la la salida del convertidor DC – DC Buck, suministre la energía necesaria a la batería para que esta llegue a su etapa de absorción

3. Diseño del Control por Modo Deslizante

Se presentan dos métodos con el fin de controlar la tensión de salida de un convertidor reductor Buck, CdD/ CD. Control en modo deslizante directos e indirectos. El control directo se basa en la retroalimentación del voltaje de salida (Vc), y este es comparado directamente con el voltaje de referencia (Vr).
La superficie de deslizamiento es la siguiente:

$$S = V_C - V_r \quad (12)$$

El control indirecto está basado en el control de la corriente del inductor para obtener el voltaje de salida deseado, en este método es posible la variación de la carga. En

principio la impedancia de salida se determina por la división entre el voltaje de salida y la corriente de salida y luego la corriente de la carga deseada es calculada por la división del voltaje de referencia por la impedancia de salida. Mediante la adición de un coeficiente de corriente del capacitor a se determina la corriente del inductor deseado

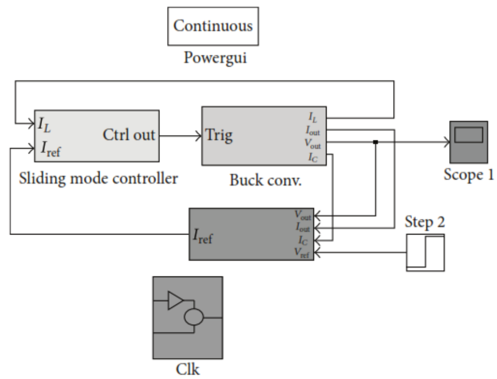


Figura 23. Diagrama de bloque de control indirecto de modo deslizante. Fuente: Maestre (2014)

La superficie de deslizamiento está definida por la siguiente expresión:

$$S = I_l - I_{lr} \quad (13)$$

La figura 23 muestra el diagrama de bloques directa e indirectamente del convertidor Buck aplicando modo deslizante. En la figura 51 se muestra los resultados de la simulación, con un voltaje de entrada E = 10V, l= 1mH, C=2200µF, R= 25Ω. Para la evaluación y validación de la precisión y rendimiento del controlador propuesto, se realizó un análisis de cada situación y se determina que el método indirecto de modo deslizante es el que presenta mejor desempeño en comparación con el método directo, y está relacionada con la selección adecuada de sus parámetros, el controlador propuesto es robusto y se puede utilizar en todos los convertidores DC/DC.

El diseño propuesto del sistema solar fotovoltaico se detalla a continuación:

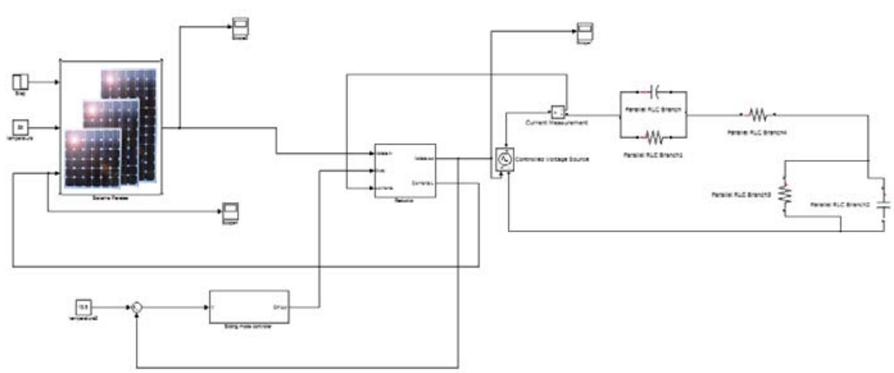


Figura 24. Simulación del SFV con control modo deslizante en Matlab/simulink. Fuente: Maestre (2014).

En la figura 25 se muestra la simulación del comportamiento de sistema fotovoltaico retroalimentado y controlado por el modo deslizante, ante una perturbación:

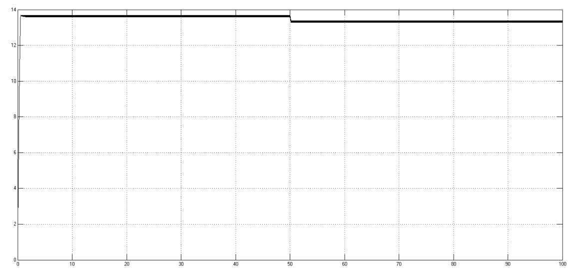


Figura 25. Salida de voltaje del sistema con control deslizante bajo una perturbación. Fuente: Maestre (2014).

Se comprueba que el sistema retro alimentado tiene mejor respuesta y rebutes que el SFV de lazo abierto, esto es debido a que el control deslizante se mueve en base a una superficie de deslizamiento previamente diseñada, esto permite, que aun en los momentos de baja irradiación solar, o temperaturas superiores a los 25ºC, el sistema alcanza a suministrar energía a la batería, y esta puede alcanzar la etapa de absorción y/o flotación depende del voltaje en que este encuentre

III. RESULTADOS

Con el fin de evaluar estas las opciones, se toma como caso de estudio el alumbrado de una vía de 2 carrileras con una clase de iluminación ME3, de acuerdo a la norma CIE-115. La simulación empleando el programa CalcuLux Road [CalcuLux, s/a] permitió determinar que una opción para cumplir con los requerimientos establecidos es emplear luminarias Philips del tipo BGP322 80xGRN 1S/740 DX [Philips-b, 2011], colocadas a 7 m de altura en una configuración unilateral con una separación de 30 m entre los postes.

En la tabla 2 se muestra la información de partida utilizada en el estudio. El costo unitario de la interconexión eléctrica, 25,83 USD/m, fue tomado de la oferta de un proyecto del sistema de iluminación vial de una instalación turística con características similares al empleado en este trabajo, siendo esto de gran relevancia.

Tabla 2. Datos de entrada para el caso de estudio

Característica	U.M.	Valor
Flujo luminoso	Lm	8,400
Eficiencia de la lámpara	lm/W	88
Precio de la lámpara	USD/klm	101
Costo unitario de la instalación	USD/m	25,83
Longitud de la instalación	M	893
Cantidad de postes	U	30
Precio del poste	USD	567
Construcción y montaje	USD/poste	800
Precio unitario del sistema FV	USD/Wp	5
Tamaño del sistema FV	Wp	400
Construcción y montaje – FV	USD/poste	400

Potencia de la lámpara	W	96
Precio del kWh	USD	0,3

Fuente: Maestre (2014)

Los costos de construcción y montaje en la opción fotovoltaica son inferiores a los de la versión alambrada, debido a que se evita el zanjeado, la colocación de los cables, la instalación de transformadores, etc. Una primera aproximación razonable es asumir que en la instalación de luminarias solares los costos por este concepto son 50% de los de una instalación convencional (tabla 3). En el precio unitario del sistema FV se incluyen, además, los costos asociados a la estructura de montaje de los paneles y las baterías.

Tabla 3. Comparación de los costos de inversión inicial

	Convencional	Fotovoltaica
Lámparas	25.452	25.452
Alambrado	23.078,54	
Sistema FV		60.000
Postes	17.010	17.010
Const. y Mon.	24.000	12.000
Subtotal	89.540,54	114.462,00
Otros	1.790,81	2.289,24
Total	91.331,35	116.751,24

Fuente: Maestre (2014)

En Otros se han incluido los costos asociados a fletes, proyectos, preparación del terreno, etc. La experiencia en la evaluación de otras inversiones, permite asumir un costo por este concepto de alrededor de 2% del subtotal de la inversión inicial.

Al analizar los egresos anuales (tabla 4) se aprecia que en la instalación conectada a la red estos se asocian con los costos de mantenimiento y la factura de la electricidad, mientras que en las luminarias solares solo se tienen los gastos de mantenimiento, los cuales en este trabajo se consideran 3% del costo de equipamiento de la inversión inicial (Wu *et al*, 2008).

Tabla 4. Egresos anuales

	Alambrado	Fotovoltaica
Mantenimiento	1.963,62	3.063,55
Factura de electricidad	1.893,53	
	3.857,15	3.063,55

Fuente: Maestre (2014)

Si la diferencia en la inversión inicial entre ambas variantes se compensa con la diferencia en los egresos anuales, el tiempo necesario para la igualdad de los costos acumulados es de 32,03 años, por lo que en estas condiciones la opción fotovoltaica no es factible.

Es conveniente precisar las condiciones en que en el nivel actual de eficiencia de las lámparas, 80-115 lm/W, resulta viable la variante fotovoltaica. La tabla 5 muestra los puntos de igualdad en los que los costos de inversión entre ambas variantes se igualan. Los valores de la columna «USD/m» en los sistemas conectados a la red se obtienen del cociente entre el costo del alambrado y la longitud de la instalación.

Tabla 5. Puntos de igualdad

USD/Wp	USD/m
5	53,8
6	67,1
7	80,5
8	94,0

Fuente: Maestre (2014)

Se requieren costos unitarios de la instalación eléctrica de casi 54 USD/m, para que las luminarias solares se puedan emplear a un costo de 5 USD/Wp del sistema fotovoltaico. El aumento de la eficiencia de los LEDs, unido a la disminución de los costos del sistema fotovoltaico, conlleva a la disminución del valor umbral a partir del cual es factible la opción solar.

Tabla 6. Otros puntos de igualdad

lm/W →	110-145	145-160
USD/Wp ↓	USD/m	
3	6,7	0,0
4	13,4	4,6
5	20,1	9,2
6	26,8	13,8

Fuente: Maestre (2014)

Manteniendo los 5 USD/W de la parte fotovoltaica, si la eficiencia de la lámpara se encuentra en el intervalo 110-145 lm/W, el punto de igualdad se mueve de 53,8 m a 20,1 m, haciendo factible la variante de luminarias solares en el caso analizado (tabla 6).

De todas las consideraciones anteriores, se tiene que cubriendo el objetivo general de la investigación, con respecto al diseño de un sistema para convertir la energía solar fotovoltaica para el control por modo deslizante de las luminarias de la Plaza Bolívar de la ciudad de Santa Marta, se tuvo que según cada uno de los parámetros técnicos, factibles y de viabilidad de proponer esta técnica de energía alternativa, se diseñó el diagrama final del sistema propuesto, en la siguiente figura se denota dicha propuesta:



Figura 27. Diagrama final del sistema propuesto. Fuente: Maestre (2014)

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Así, se concluyó que los sistemas fotovoltaicos pueden tener las mismas aplicaciones que cualquier sistema generador de electricidad. Sin embargo, las cantidades de potencia y energía que se pueden obtener de un sistema fotovoltaico están limitadas por la capacidad de generación y almacenamiento de los equipos instalados, especialmente de los módulos y la batería respectivamente, y por la disponibilidad del recurso solar. Técnicamente, un sistema fotovoltaico puede producir tanta energía como se desee; sin embargo desde el punto de vista económico, siempre existen limitaciones presupuestarias en cuanto a la capacidad que se puede instalar.

De esa forma, se dedujo entonces que la inversión necesaria para adquirir el sistema fotovoltaico dependió de varios factores, como: los precios internacionales del mercado fotovoltaico, la disponibilidad local de distribuidores e instaladores de equipos fotovoltaicos, la ubicación y demanda energética de los usuarios. Así, las características particulares de todos los equipos necesarios para satisfacer la demanda energética (en calidad, cantidad y capacidad), la distancia y la facilidad de acceso entre el lugar de venta de los equipos y el lugar donde se instalará el sistema (en cantidad de kilómetros por recorrer en vehículo todo terreno, en vehículo normal, en bestia o caminando), y los márgenes de ganancia de vendedores e instaladores de equipos (generalmente entre el 10- 30%), son factores que determinaron en gran medida la cantidad de dinero que el usuario final invertirá para electrificar el espacio público.

De allí, que los sistemas fotovoltaicos han demostrado su capacidad para proveer energía eléctrica a sitios aislados de la red convencional. Sin embargo, la tecnología fotovoltaica no es siempre la solución más adecuada a todos los problemas de electrificación rural de nuestros países. Dependiendo de los casos en particular, la extensión de la red convencional, el empleo de aerogeneradores o el uso de pequeñas centrales hidroeléctricos, pueden ser alternativas válidas. Como regla general, antes de comprar cualquier equipo se debe evaluar detenidamente si éste es la mejor opción o no a un caso particular. Incluso, aun cuando ya se haya decidido utilizar la opción fotovoltaica, el tipo de sistemas que se instalará (CD, CA o Centralizado) es una decisión muy importante que se debe tomar a partir de las necesidades energéticas actuales y futuras y de la disponibilidad económica.

De esa forma, se recomendó que el inversor instalado permita la conexión al sistema de un motogenerador auxiliar y se puede instalar un sistema automático para el arranque del mismo, lo cual si bien no se incluyó en este sistema, pudiera ser una añadidura interesante para hacer que el sistema sea aún más completo. Adicionalmente se pudiera instalar un sistema automático de monitoreo y control de este sistema, lo cual lo haría bastante atractivo desde el punto de vista didáctico.

Asimismo, si bien este sistema se diseñó para que los módulos fotovoltaicos sean los cargadores de las baterías, el inversor también se puede utilizar para este fin en caso de que fuera necesario (Por ejemplo, si se requiere una carga rápida de las baterías).
Por su lado, igualmente se recomienda instalar un sensor de temperatura en el banco de baterías a fin de que los controladores de carga puedan ajustar sus valores de tensión máximos y mínimos en función de la temperatura en todo momento. En caso de que se utilice el inversor como cargador, ya este incluye su propio sensor.

De esa forma, si a este sistema se van a conectar cargas diferentes a aquella para la cual se diseñó, se debe tener en cuenta que la autonomía de las baterías se puede ver modificada, por lo que se recomienda calcular primero la nueva autonomía que las baterías le pueden brindar a la carga, antes de conectar esta.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Psicological Asociation. (1999). Manual de estilo de publicaciones. México. Editorial El Manual.

Bavaresco, A. (2008). El Proceso Metodológico en la Investigación. Cómo hacer un Diseño de Investigación. Caracas.

Briceño, J. (1998). Transmisión de datos. Consejo de Publicaciones de la ULA. Primera Edición. Mérida –Colombia.

Creus, Antonio. (1997). Instrumentación Industrial. 6° edición, Alfaomega marcombo. México.

Corripio, Smith. (1991). Control Automático de Procesos. 1º edición. México

David M. Himmelblau (1997) Principios básicos y Cálculos en Ingeniería Química. Sexta edición. Pearson, Prentice hall México

Felder R y Rousseau R (1991). Principios Elementales de los procesos químicos. Addison-Wesley.

Fernández, H.; Martínez, A.; Guzmán, V.; Giménez, M.; Díaz; A. (2012). Modelado y simulación en PSCAD de celdas fotovoltaicas. Revista Universidad Ciencia y Tecnología. UNEXPO. Vice-Rectorado Puerto Ordaz - Dirección de Investigación y Postgrado. Urb. Villa Asia. Final Calle China. Edificio de Investigación y Postgrado. Puerto Ordaz. Estado Bolívar.

Ledezma, O. (2000). Evaluación – Económica de Proyectos de Automatización. Universidad Corporativa CIED. Colombia.

Manual de CIED de Instrumentación Industrial (1993). Pequiven- El Tablazo.

Ogata, Katsuhiko. (1998). Ingeniería de control moderna. 3° edición. Prentice Hall. México.

Ojeda Pérez. A. (1998). Instrumentación de Procesos. Pequiven- MVC II.

PDVSA (1985) Manual de Operación. Sala de control Refinería PDVSA, punto fijo.

Pallás A., R. (1998) Transductores y Acondicionadores de señales. Editorial ULA.

Rivera, D. (1999). Process Dynamics and Control; Introduction to Internal Model Control with Application to PID Controller Tuning. 1999.

Shinskey (1998). Sistemas de Control de Proceso. 1º edición. Editorial Mc Grawhill